

# 種々の電源システムに応用できる 回転形位相調整機

Rotary Phase Shifter as Power Compensator for Various Power Source Systems

宮崎 保幸

■ MIYAZAKI Yasuyuki

影山 隆久

■ KAGEYAMA Takahisa

石月 照之

■ ISHIZUKI Teruyuki

環境負荷低減のため、風力、太陽光などの再生可能エネルギーを利用した電源システムの導入が進んでいる。再生可能エネルギーを利用した電源システムの出力は、自然現象の影響を受け不規則に変化し不安定である。

東芝はこのような種々の電源システムの導入推進に貢献するため、電源システムの出力を安定化し電力品質を維持する系統連系装置として、回転機技術と制御技術をベースとした回転形位相調整機を開発した。試作した回転形位相調整機を風力発電設備端に設置し、秒オーダの電力出力変動を低減できることを確認した。

Utilization of renewable energy resources such as wind power and solar power is of primary importance for solving energy and environmental problems. However, renewable energy resources depend on natural conditions and it is difficult to consider renewable energy plants as constant power sources.

Toshiba has developed a rotary phase shifter in order to promote the diffusion of various power supply systems. This rotary phase shifter is a type of compensator based on rotating machine and system control technologies. A prototype rotary phase shifter was installed in a wind power equipment terminal, and its satisfactory control performance was verified.

## 1 まえがき

環境負荷低減のため、風力、太陽光などの再生可能エネルギーを有効利用する電源システムの導入が進んでいる。これらの再生可能エネルギーを利用した電源システムの出力は、自然現象の影響を受け電力需要とは無関係に、不規則に大きく変化する特徴を持っている。

特に、風力発電の適地は電力消費の多い地域とは限らず、電力需要が少なく、送配電線などの容量が小さい弱い電力系統に連系されることが多い。出力変動を伴う電源システムを弱い電力系統に連系した場合、電圧や周波数などの電力品質への影響が大きく、電源システム導入の障害になることが懸念されている。

そこで東芝は、2001年度から3年間にわたり新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)及び経済産業省の産業技術実用化開発費補助事業の助成を受け、風力発電システムの出力変動に対し適当な応答特性を備え、かつ低コストなシステムとして回転形位相調整機を適用した電力変動補償装置の実用化開発を実施した。

実用化開発では、100 kVAの電力を調整可能な回転形位相調整機による補償装置を試作し、風力発電設備端に設置して電力変動の抑制効果を検証した。

ここでは、回転形位相調整機の概要と、適用と制御効果、実風力発電設備端での検証試験による回転形位相調整機の制御性能評価結果について述べる。

## 2 回転形位相調整機

回転形位相調整機は、構造上は一種の誘導機であり、巻線形誘導機とその回転子駆動装置から構成される。回転子の回転角度を回転子駆動装置で制御することで電力を連続的に調整できる移相機として機能し、回転子回転角速度を制御すると周波数変換機としても活用できる。

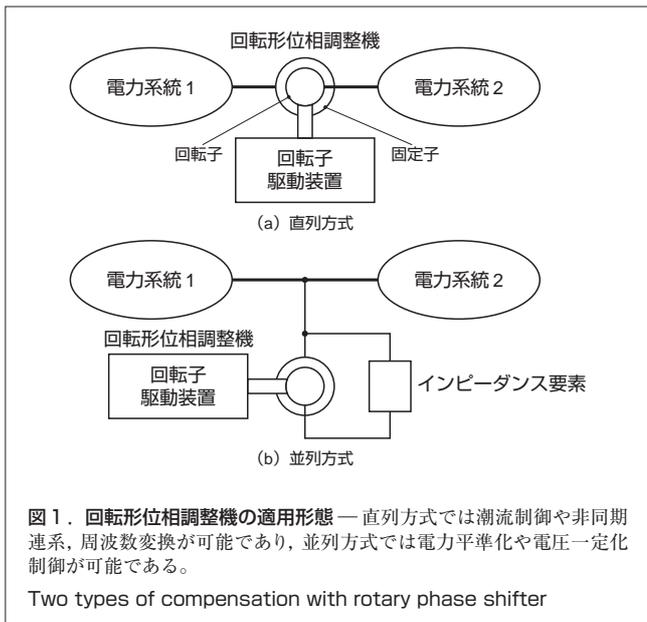
回転子駆動装置は駆動モータと制御装置から成り、回転子駆動の制御応答は秒オーダとなる。電源システムの出力変動の多くは秒オーダ以上であるので、その出力変動抑制には十分な制御速度である。また構造上は誘導機であるため、過電流耐量が大きいこと、高調波の発生がないこと、コンパクト化が可能などの特長を持っている。

当社は可変速揚水発電システムの分野において、容量30万kVAクラスの誘導機(交流励磁同期機)の製作実績を持っており、誘導機技術をベースとする回転形位相調整機も30万kVAクラスの製作までは可能と考えている。

## 3 回転形位相調整機の適用と効果

回転形位相調整機の適用は、大きく直列方式と並列方式の二つの形態が考えられる。これら2形態の概念構成を図1に示す。

直列方式では、回転形位相調整機を二つの電力系統間に直列に接続する。回転子駆動装置で回転子の回転角度又は

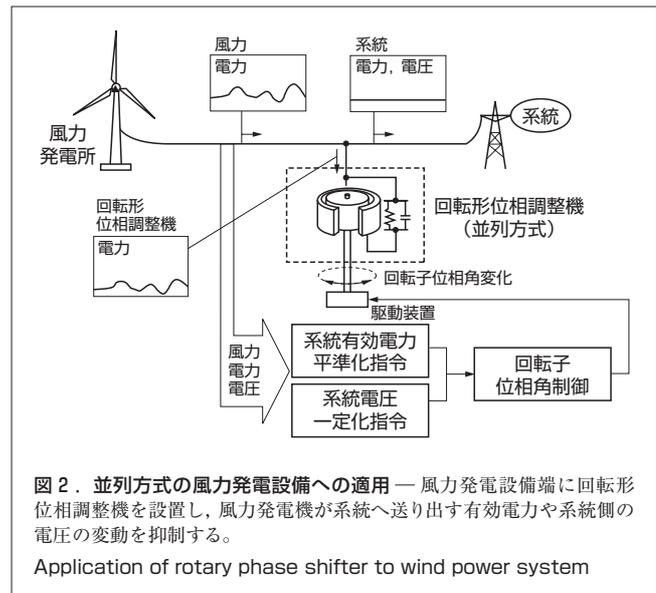


回転角速度を制御し、電力システム1と電力システム2の間の位相差又は周波数差を調整する。したがって、直列方式では非同期連系装置や周波数変換装置、電力の流れ方を調整する電力潮流制御装置として利用することができ、例えば、複数の分散型電源を含むマイクログリッドと商用系統間の、電力融通量と電力品質を調整する系統連系装置としても利用することができる。

並列方式では、回転形位相調整機を電力システム1と電力システム2を連系する送電線に並列接続し、更に回転形位相調整機の回転子と固定子の間にインピーダンス要素を接続する。回転子の回転角度調整によりインピーダンス要素両端子の電圧位相を変化させ、インピーダンス要素の見かけのインピーダンス値を連続可変する。インピーダンス要素としてリアクトルやコンデンサを接続した場合には、連続可変無効電力調整装置として動作し、電力系統の電圧変動を抑制可能な電圧制御装置として利用できる。

インピーダンス要素を抵抗とした場合には、連続可変抵抗機として動作する。この場合、風力発電システムなどから出力される過剰な電力変動を消費し、系統に出力する電力変動を低減できる。図2は風力発電の出力変動抑制に適用した場合の回転形位相調整機のシステム構成である。

系統側へ出力する有効電力を一定値となるように回転形位相調整機を調整する場合は、系統側での電圧変動や周波数変動が抑制され電力品質が維持されるため、ウインドファームのような大規模風力発電所への適用に向く。また系統に出力する許容電力値を設定し、許容電力値を超過する出力電力を抑制するよう回転形位相調整機で制御することも可能である。この制御方法を適用すると、回転形位相調整機による系統への出力電力の連続的な調整により、風車側で



の出力調整が不要となるので、風車側に負担を与えることなく、系統への有効電力出力の増加が期待できる。

## 4 小規模試験装置の製作

### 4.1 工場試験結果と評価

回転形位相調整機の適用例である並列方式回転形位相調整機の基本的な静特性と動特性を確認するため、試作した回転形位相調整機本体、風力発電シミュレータ、模擬送電線、模擬負荷を組み合わせて検証試験を実施した。

工場試験装置のシステム構成を図3に示す。配電系統に接続された風力発電機の出力変動を抑制することを目的に、

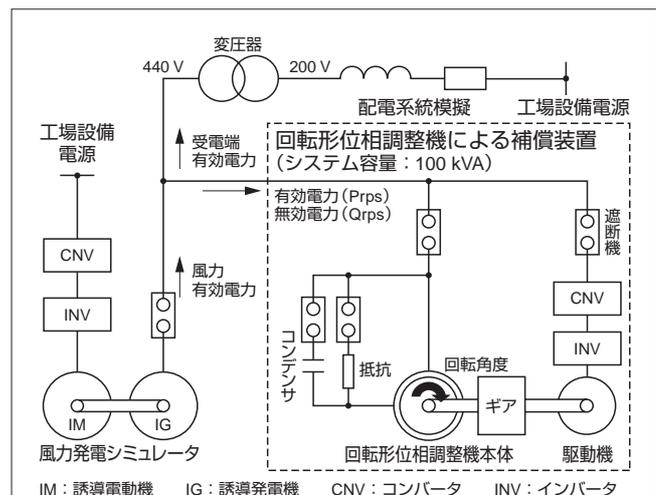


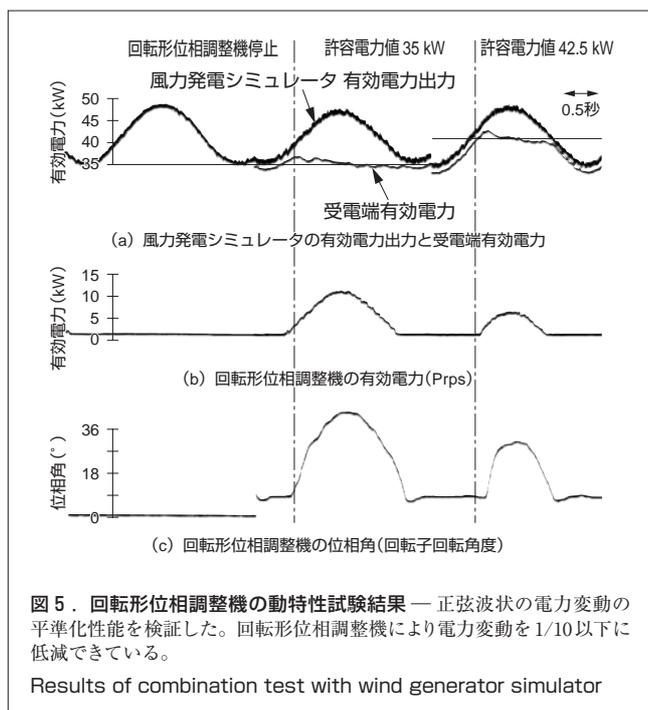
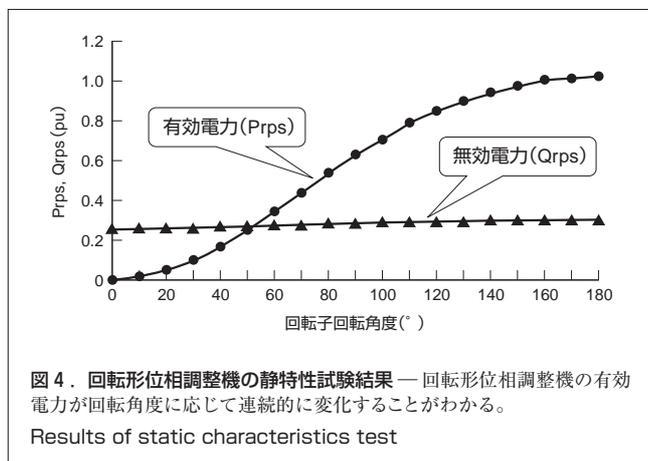
図3. 工場試験時のシステム構成 — 発電機出力を任意の変動パターンに制御できる風力発電シミュレータと回転形位相調整機による補償装置を接続して工場試験を実施した。

System configuration at time of factory test

回転形位相調整機を風力発電シミュレータ端に接続する構成とした。

インピーダンス要素を抵抗とした場合の回転形位相調整機の静特性試験結果(図4)に示すとおり、有効電力( $P_{rps}$ )が位相角(回転子回転角度)の変化に伴い、連続的に変化することがわかる。

風力発電シミュレータの出力を35kWから50kWの間で、2秒周期の正弦波状に変動させた場合の動特性試験結果を図5に示す。縦の一点鎖線で区切った左側から、回転形位相調整機を停止した場合、回転形位相調整機を運転し35kWをシステムの許容電力値とした場合と、42.5kWを許容電力値とした場合である。風力発電シミュレータの有効電力出力が許容電力値を超えると、回転形位相調整機の位相角を制御して、抵抗で消費する有効電力を連続的に調整するこ

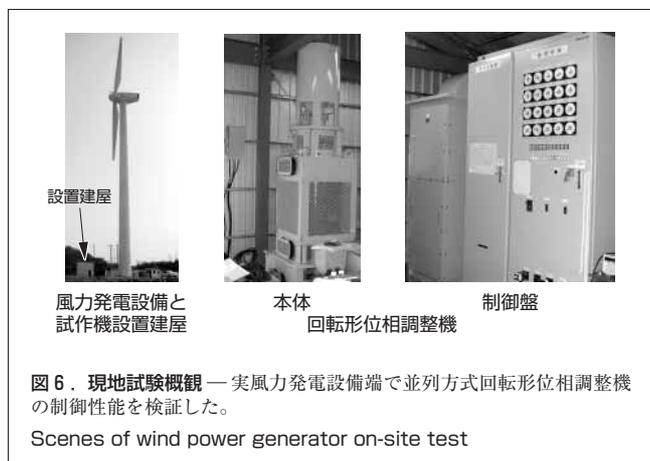


とにより、系統に出力する有効電力を許容電力値以内に制限していることがわかる。この結果から、回転形位相調整機を運転することにより、受電端有効電力の変動を回転形位相調整機停止の場合に比べて10%以下に低減することができ、電力平準化効果を確認することができた。

#### 4.2 現地試験結果と評価

工場試験で得た電力平準化の効果が、実際の風力発電設備で得られることを検証するために、回転形位相調整機を実配電系統に接続された実機の風力発電設備と組み合わせた現地検証試験を実施した。

現地試験風景を図6に示す。工場試験の試験構成と同様に、回転形位相調整機を風力発電設備の出力端に接続して、風力発電設備の有効電力を検出して制御する並列方式で現地検証を行った。



実際の風力発電設備の有効電力変動は、風の強弱に起因する数十～数百秒オーダの変動に、風車羽根の回転に起因する約1秒周期と約3秒周期の変動が重畳した波形であることを確認した。そこで、有効電力の変動分のみを抑制することを目的に、有効電力変動の極小値に追従した値を電力平準化値の目標値とし、電力平準化目標値以上の有効電力を回転形位相調整機で消費させることで、系統に出力する有効電力を平準化させる電力平準化方式を検証した。図7に電力平準化の効果を確認した結果を示す。

図7の波形のとおり、風力発電機の有効電力出力の約1秒周期の変動幅が約50kWあり、この変動分の約50kWを回転形位相調整機で消費させることにより、系統に出力する有効電力は、ほぼ電力平準化目標値となった。

以上、現地試験の結果から、回転形位相調整機なしの場合と比較し、約1秒周期の有効電力変動を40%程度に低減でき、また、約3秒周期の有効電力変動を同10%程度に低減できる効果を得た。

一方、許容電力値を100kWに設定し、許容電力値を超過

## 6 あとがき

種々の電源システムに対し連系装置として適用できる回転形位相調整機を開発した。回転形位相調整機を試作し、工場試験や風力設備端における現地試験を通じて、風力発電出力の平準化や異系統間の連系装置としての制御性能やその有用性を確認した。

将来の分散型電源増大時における系統安定化ソリューションとして、回転形位相調整機が広く適用されることを期待している。

## 謝 辞

回転形位相調整機の実用化開発は、経済産業省、NEDOの補助事業、助成事業として2001年度から2003年度にかけて実施してきたものである。開発に際しご指導ご鞭撻(べんたつ)いただいた経済産業省、NEDOをはじめ、共同研究を通してご指導いただいた東京工業大学 嶋田隆一教授に深く感謝の意を表します。

## 文 献

- (1) Molinas, M., et al. Analytical and Experimental Study of a Rotary Phase Shifter for Power System Applications. 電気学会論文誌B. 120, 10, 2000, p.1336 - 1342.
- (2) 宮崎保幸,ほか. 回転形位相調整機による風力発電設備の出力変動安定化. 電気学会論文誌B. 124, 5, 2004, p.714 - 722.

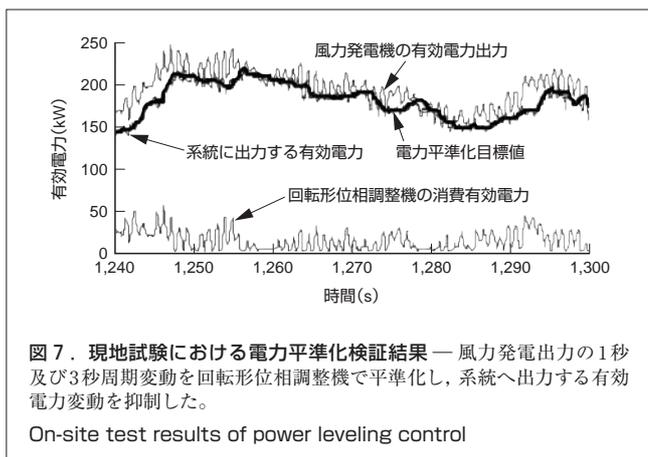


図7. 現地試験における電力平準化検証結果 — 風力発電出力の1秒及び3秒周期変動を回転形位相調整機で平準化し、系統へ出力する有効電力変動を抑制した。

On-site test results of power leveling control

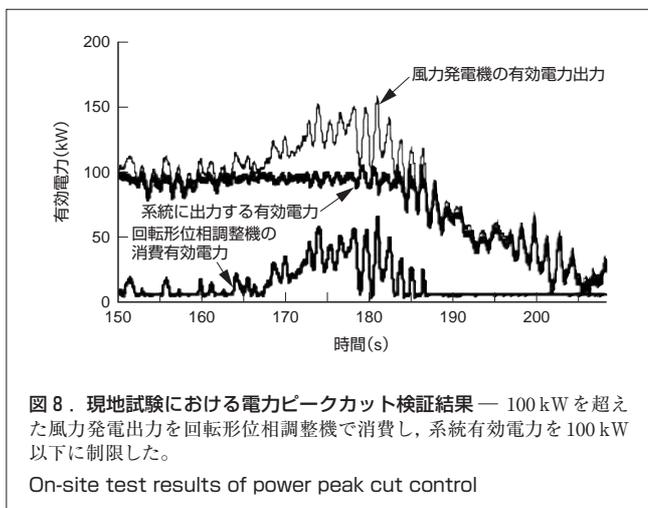


図8. 現地試験における電力ピークカット検証結果 — 100 kWを超えた風力発電出力を回転形位相調整機で消費し、系統有効電力を100 kW以下に制限した。

On-site test results of power peak cut control

した電力を回転形位相調整機で吸収するピークカット検証試験の結果を図8に示す。

風力発電設備の有効電力が100 kWを超過した時点で、回転形位相調整機が超過した有効電力を消費することにより、系統へ出力する有効電力を許容変動値以内に抑えることができた。

以上の結果から、回転形位相調整機を風力発電設備の電力ピークカット機能として適用可能であることが検証できた。

## 5 その他の試験結果

試作回転位相調整機を用い、電圧一定化制御効果を工場試験と現地試験で検証した。また、直列方式による2系統間の周波数変換、及び非同期系統連系と電力潮流制御性能を工場試験で検証した。試験結果から回転形位相調整機が理論どおりに動作すること、秒オーダー程度の制御応答が可能なことを確認した。



宮崎 保幸 MIYAZAKI Yasuyuki

電力・社会システム社 電力・社会システム技術開発センター エネルギーソリューション開発部主務。各種システム機器の研究・開発に従事。電気学会，計測自動制御学会会員。  
Power and Industrial Systems Research and Development Center



影山 隆久 KAGEYAMA Takahisa

電力・社会システム社 府中電力・社会システム工場 発電制御システム部主査。可変速揚水ほかパワエレ機器の制御装置の開発設計業務に従事。電気学会，情報処理学会会員。  
Fuchu Operations - Industrial and Power Systems & Services



石月 照之 ISHIZUKI Teruyuki

電力・社会システム社 火力水力事業部水力プラント技術部主査。水力発電所電気機器エンジニアリング業務及び可変速揚水技術応用エンジニアリング業務に従事。電気学会会員。  
Thermal Power and Hydroelectric Power Systems & Services Div.